



A. Koch

Eingebettete Prozessorarchitekturen

7. Rekonfigurierbare Prozessoren

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Informatik, TU Darmstadt

Wintersemester 2006/2007



- Auszüge aus Trainingsmaterial der Fa. Stretch
 - Insbesondere alle Zeichnungen und technischen Daten
- Material ist **vertraulich**
 - Nur für die Lehre zur Verfügung gestellt
 - Darf **nicht** weiterverbreitet werden

Bisheriger Stand

Eingebettete VLIW-Prozessoren



A. Koch

- Einfache Hardware-Strukturen für **ILP**
- Verlagerung des Aufwands auf Compiler
- *Grob* an Erfordernisse anpassbar
 - Anzahl an allgemeinen Ausführungseinheiten (ALU, MUL, ...)
 - Anzahl an Registerfeldern
- **Vor** der Chip-Fertigung

Bisheriger Stand

Konfigurierbare Prozessoren



A. Koch

- Sehr einfacher Basis-Prozessor
- Einfache sequentielle Ausführung
- *Nicht* optimiert auf ILP
- **Fein** an Erfordernisse anpassbar
 - Konfigurierbare spezielle Recheneinheiten
 - MAC, Vector, ...
 - Erweiterbarkeit um **eigene** Instruktionen
 - Haben eigenen Speicherzugriff
 - I.d.R. nur wenige Takte lang, kein komplexen Automaten
 - VLIW-artiges Modell möglich
- Anpassung **vor** der Chip-Fertigung

Diskussion VLIW und konfigurierbare CPUs



A. Koch

- Abstimmen auf unterschiedliche Anwendungen erfordert Chip-Fertigung
- Nur bei sehr großen Stückzahlen wirtschaftlich
- Änderungen nur beschränkt möglich
 - Nur soweit in ursprünglichem Aufbau vorgesehen
- Änderbarkeit ist aber praktisch relevant
 - Viele "Standards" ändern sich leicht vor Festlegung
 - Nachrüsten von Features der Konkurrenz
 - Korrigieren von Fehlern (gibt es auch in Hardware!)

➡ Mehr Flexibilität wünschenswert

Rekonfigurierbare Prozessoren

Idee



A. Koch

- Änderbarkeit des Prozessor auch **nach** der Fertigung
 - Ohne photochemische Prozesse
 - Nennt sich **Rekonfigurierbarkeit**
- Problem
 - Rekonfigurierbare Strukturen kosten mehr Platz als feste
 - ... daher nicht alles rekonfigurierbar halten
 - Wäre der FPGA-Ansatz
 - Stattdessen **gezielt** rekonfigurierbare Bereiche einbauen
 - Hier verallgemeinert **Reconfigurable Area** (RA) genannt

Flächenaufwand der Rekonfiguration



A. Koch

- Rekonfigurierbare Funktionen **größer** als feste, aber ...
- Gleiche RA kann **unterschiedliche** Funktionen bereitstellen
- Wenn Funktionen nicht gleichzeitig gebraucht werden
- **Wiederverwenden** der teuren RA möglich
- Kann sogar **billiger** sein, als alle evtl. gebrauchten Funktionen als feste Logik zu realisieren!
 - Beispiel: Digitaler Rundfunk (verschiedene Empfangsstandards)

Geschwindigkeit der Rekonfiguration



- Wie schnell ist die Rekonfiguration möglich?
- Einige Sekunden ... **Statische Rekonfiguration**
 - Ändern der konfigurierten Funktion lohnt sich nur selten (zu langsam!)
 - Umschalten von Betriebsmodi
 - H.264 oder VC-1 Video Decoder, Selbsttestmodus
- Einige Millisekunden ...
 - Gelegentliche Änderung akzeptabel
 - Anpassung an *verschiedene* Anwendungen bei jeweiligem Programmstart
 - Spezielle Beschleuniger z.B. für Bildverarbeitung, Crypto, ...
- Einige Mikrosekunden ... **Dynamische Rekonfiguration**
 - Änderungen auch *während* der laufenden Anwendung praktikabel
 - Anpassung an verschiedene *Teile* der Anwendungen
 - Beschleuniger für Unterfunktionen zum Filtern, Quantisieren, Komprimieren, ...

A. Koch



Rekonfigurierbarer Prozessor koppelt

- Feste Standard-Prozessor-Pipeline der CPU
- RA eingebunden direkt in **Pipeline** als **Funktionseinheit(en)**
- Enge Kopplung, RA kann aber CPU-Pipeline verlangsamen

A. Koch

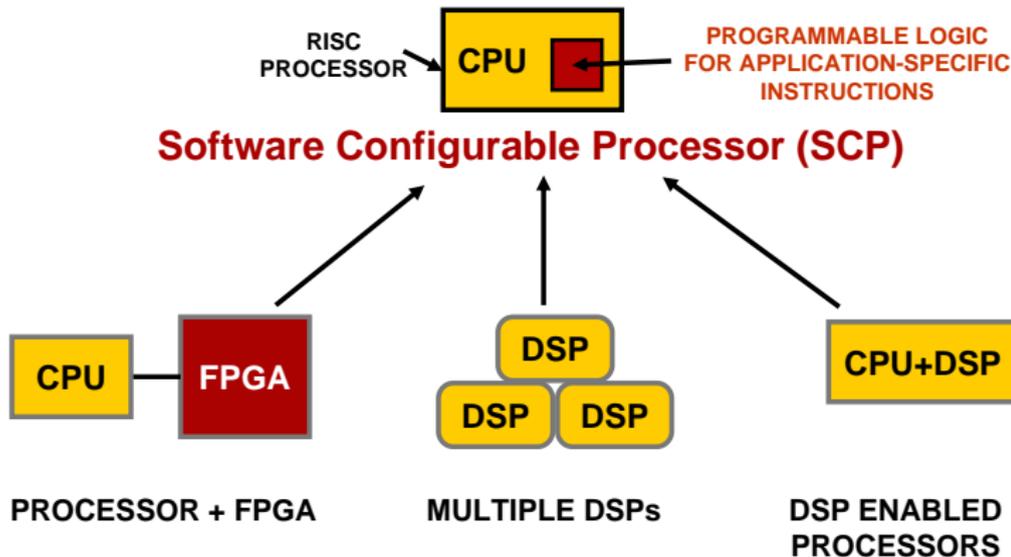
Kontrast: **Adaptiver Computer** (später) kombiniert

- Festen Standard-Prozessor
- RA angebunden an **Prozessorbus** auf Cache-Ebene
- *Nicht* mehr nur in Pipeline
- Lose Kopplung, RA und CPU agieren gleichberechtigt parallel (pseudo-SMP)

Rekonfigurierbarer Prozessor Stretch S5000

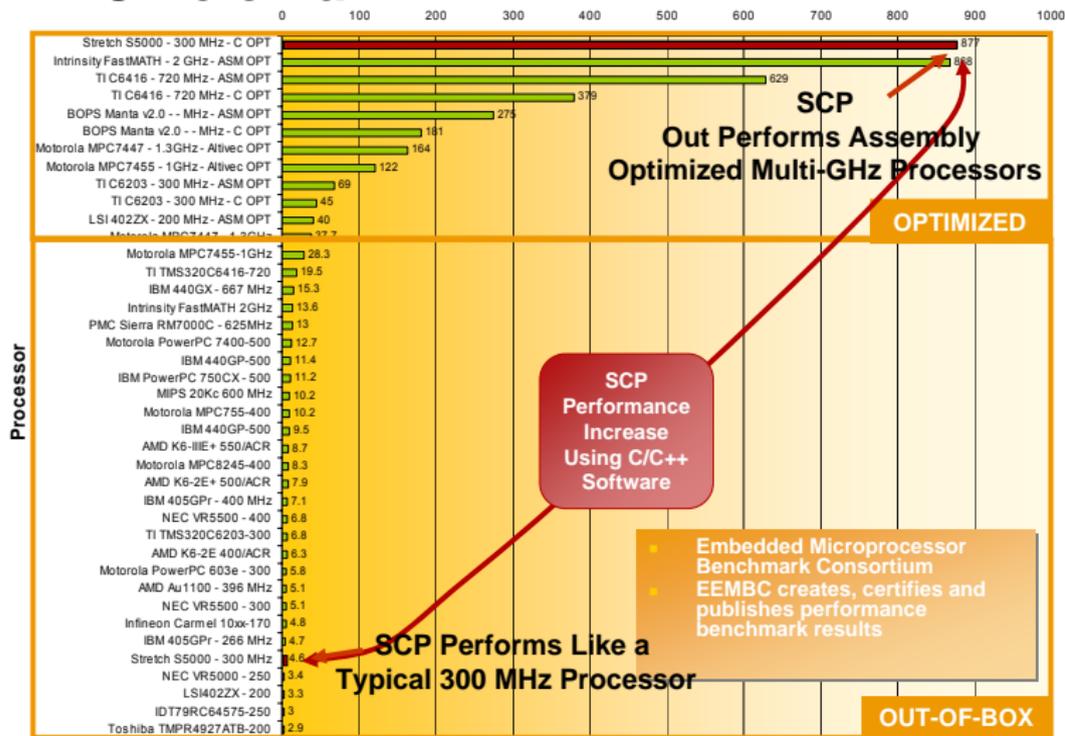


A. Koch



RA eingebunden in Pipeline

Gewinn an Rechenleistung



A. Koch

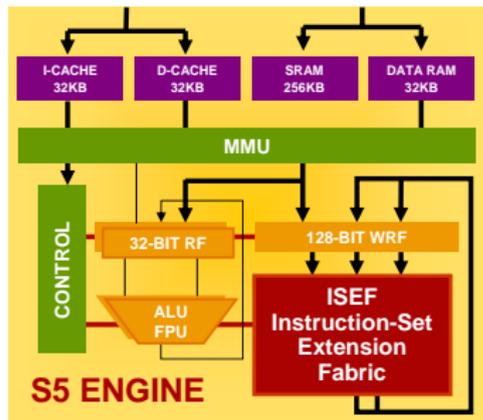
Ähnlich konfigurierbarer Prozessor, nun aber Funktion änderbar

Kernarchitektur *S5 Engine*

Mix aus festen und rekonfigurierbaren Komponenten



A. Koch

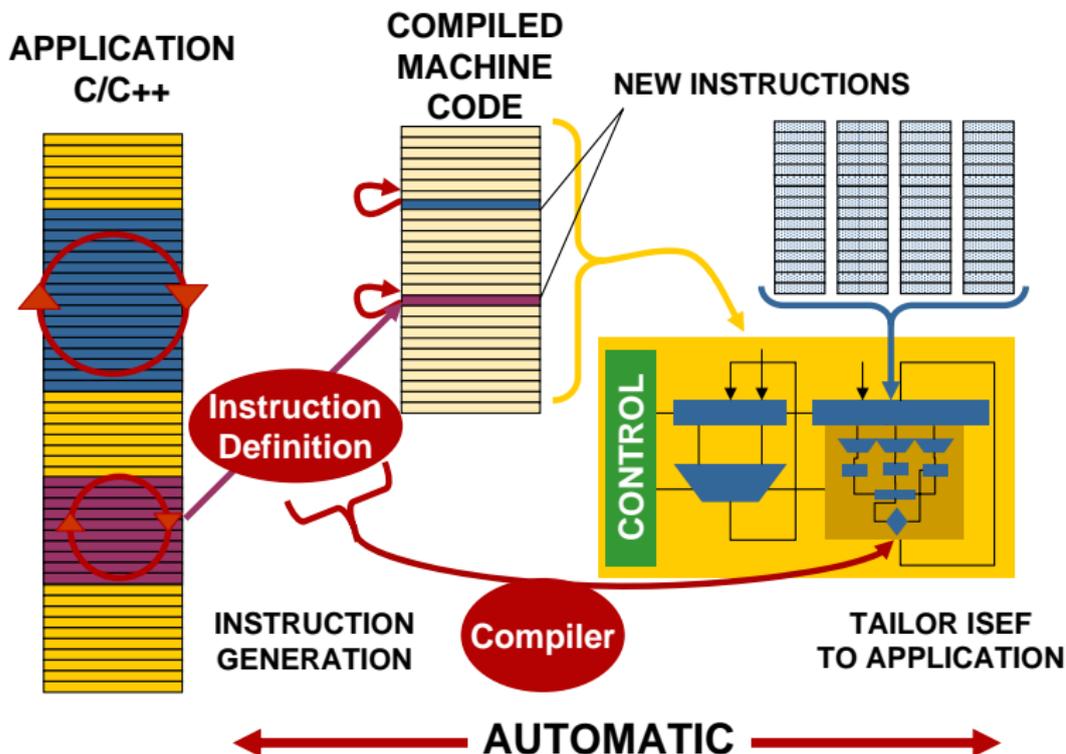


Programmierfluß

Hier: C-artiges Stretch-C statt Verilog-artiges TIE



A. Koch



Vergleich Tensilica / Stretch



A. Koch

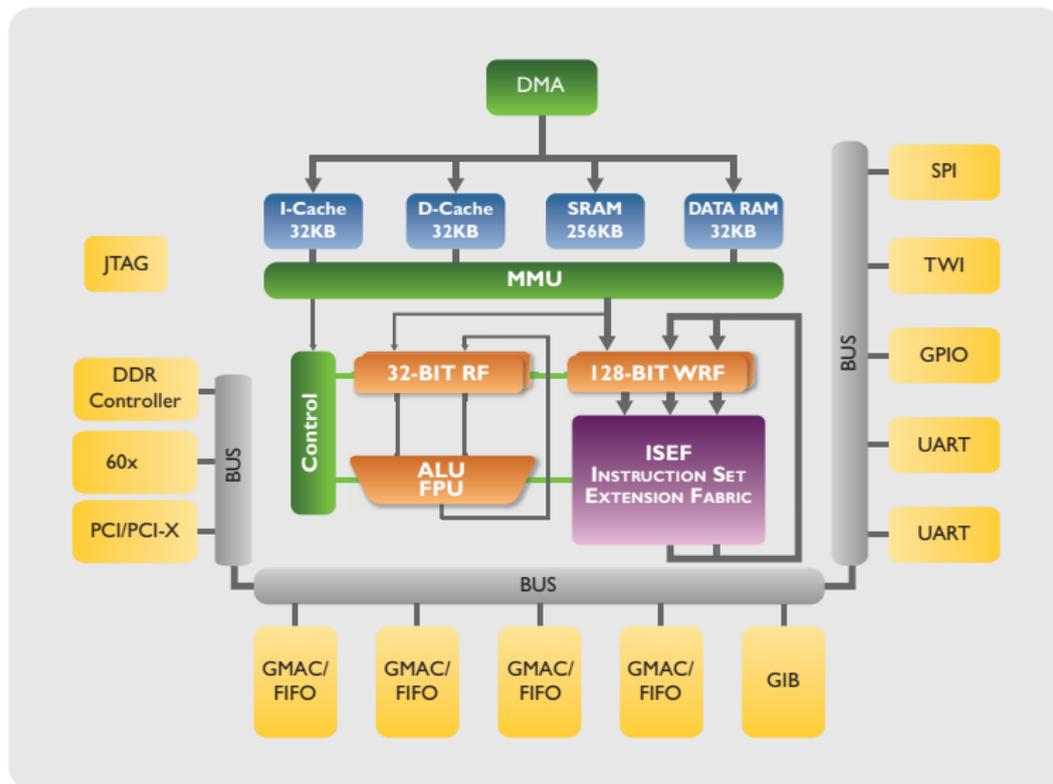
- Funktionalität wäre auch mit Tensilica-Technologie realisierbar
- Genau so wurde es gemacht
 - Ausnahme: RA in Form des ISEF
 - Stretch-eigener Hardware-Block
- Aber:
- Tensilica Werkzeuge produzieren **Teilschaltung** für größeren Chip
 - Sogenannter Intellectual Property-Block (IP Block)
 - Kunden sind für Chip-Fertigung selbst verantwortlich
- Stretch bietet **fertige** Chips an
 - Verschiedene Hardware um S5 Engine herum

Stretch S5620 Prozessor

S5 Engine mit Peripherie



A. Koch





- Noch mehr feste Bestandteile
- Realisierung von Standardschnittstellen
 - Würde in RA viel Fläche benötigen
 - Oder wäre nicht möglich
 - 1 Gb/s Ethernet MAC Schnittstelle
- Kann aber im Einzelfall ineffizient werden
 - Vielleicht braucht meine Anwendung gar kein Ethernet?
 - Die Fläche musste ich trotzdem bezahlen

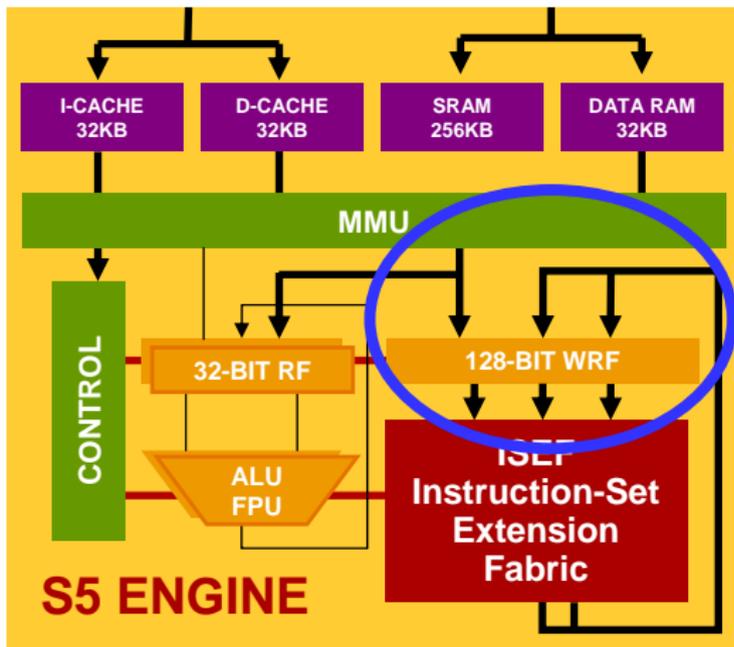
➔ Sorgfältiges Abwägen bei Systemkonzeption erforderlich!

Datenaustausch zwischen RA und festen Komponenten

Nur über Wide-Register File (WRF)



A. Koch

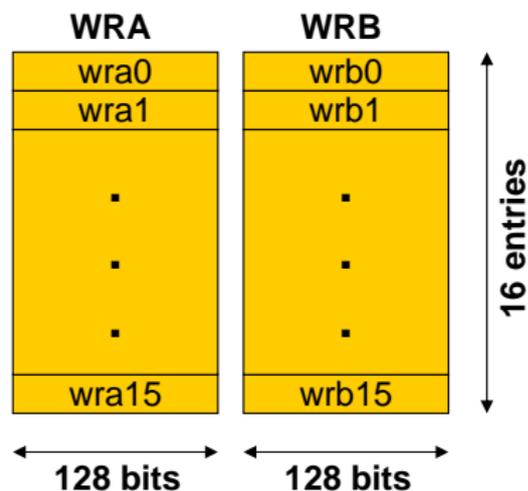


- ISEF hat **keine** Speicherschnittstelle
- Muß LSU des festen Prozessorkerns benutzen

Aufbau des WRF



A. Koch



- Zwei parallele Bänke
- 128b breite Einträge
 - Beliebig organisiert!
 - 4x 32b Integer
 - 5x RGB Pixel von je 3 Bytes
 - 12x 10b Datenworte
- Benutzung aus C
 - Analog zu Tensilica-Registerfeld
 - **WRA x; WRB y;**
 - **WR z;**
 - Compiler nimmt Zuordnung vor

Beispiel für Benutzung des WRF

Kopiere Feld aus 4 Integers



A. Koch

```
/* assume a and b are */
/* 16-byte aligned */
copy4int_implicit(int *a, int *b)
{
    WR t;
    WR *pa = (WR *) a;
    WR *pb = (WR *) b;

    t = pb[0]; /* load to t */
    pa[0] = t; /* store from t */
    /* same as pa[0] = pb[0]; */
}
```

C

```
# 2 cycles to move 16 bytes
entry    a1,32
wra128i wra0,a3,0
wras128i wra0,a2,0
retw.n
```

Stretch Assembler

Ähnlich zu Tensilica

Neue Adressierungsmodi: Postinkrement

Kopiere Feld aus N Integers



```
/* copy N integers */
copyNint_IU(int *a, int b, int n)
{
    int i;
    WR t;
    WR *pa = (WR *) a;
    WR *pb = (WR *) b;

    for (i = 0; i < n/4; i++) {
        WRL128IU(&t, &pb, 4*4);
        WRS128IU(t, &pa, 4*4);
    }
}
```

```
entry    a1,32
mov.n    a9,a2
mov.n    a8,a3
addi.n   a10,a4,3
movgez   a10,a4,a4
srai     a10,a10,2
loopgtz  a10,.LBB28_copyNint_IU
    wra128iu  wra0,a8,16
    wra128iu  wra0,a9,16
.LBB28_copyNint_IU:
retw.n
```

A. Koch

C

Stretch Assembler

- Erhöht Adressregister um gegebene Konstante
 - Hier: Jedesmal um 16 Bytes
- Wie bei Tensilica: Pseudo-Funktionen aus C

Übersicht über ausgerichtete Load/Store-Anweisungen



A. Koch

Bank	Operation	Size (bits)	Mode
WR	L (load)	128	I (immediate offset)
WRA	S (store)	64	IU (immediate post increment)
WRB		32	X (register offset)
		16	XU (register post increment)
		8	CU (circular buffer)
			RU (bit-reverse)

- Beispiel: **WRAL64IU** (**target**, **base**, **8**)
- Daten müssen im Speicher der Zugriffsgröße entsprechend **ausgerichtet** sein
 - Bei n -bit Zugriff an n -bit Grenze
 - Beispiel: Bei 128b Zugriff muß Adresse durch $128b/8b = 16$ Bytes teilbar sein
 - In C durch **Attributieren** der Deklaration
`int A[1024] __attribute__((aligned(16)))`;



A. Koch

Erstes Anwendungsbeispiel

Beispiel: Umrechnung von Farbräumen

Von RGB in YCbCr



A. Koch

Umrechnung RGB nach YCbCr

8b-Genauigkeit



Gleitkommadarstellung

A. Koch

$$y = 0.299r + 0.587g + 0.114b$$

$$c_b = -0.169r - 0.331g + 0.5b + 128$$

$$c_r = 0.5r - 0.419g - 0.082b + 128$$

16b-Fixpunkt-Darstellung

$$y = (77r + 150g + 29b)/256$$

$$c_b = (-43r - 85g + 128b + 32768)/256$$

$$c_r = (128r - 107g - 21b + 32768)/256$$

C-Code für Farbraumumrechnung



A. Koch

Color Conversion Function:

```
void rgb2ycc(  
    signed char r, signed char g, signed char b,  
    signed char *y, signed char *cb, signed char *cr)  
{  
    *y = ( 77*r + 150*g + 29*b          ) >> 8;  
    *cb = ( -43*r - 85*g + 128*b + 32768 ) >> 8;  
    *cr = ( 128*r - 107*g - 21*b + 32768 ) >> 8;  
}
```

Program Loop:

```
for (...) {  
    /* Convert 1 RGB Pixel to 1 YCbCr pixel */  
    rgb2ycc(RGB[i], RGB[i+1], RGB[i+2], &YCC[i], &YCC[i+1], &YCC[i+2]);  
}}
```

Laufzeit der reinen Software-Lösung



A. Koch

Software	WR	ISEF (Bit-Width)	ISEF (State Reg.)	Instruction Pipeline	Cycle (K Cycles)	Factor
RGB2YCC ANSI – C Only				√	3458	1

Farbraumumrechnung in Stretch-C

Definition einer neuen Instruktion auf ISEF durch Fusion



A. Koch

Color Conversion Function:

```
SE_FUNC /* Tells Stretch C-Compiler to reduce this function to an instruction */
void rgb2ycc(WR A, WR *B) /* Data Bandwidth – Move 24 bits in Single Register */
{
    se_sint<8> r, g, b, y, cb, cr;
    int i;
    r = A(7,0); g = A(15,8); b = A(24,16); /* Extract Data; No Compute Cycles */

    y = ( 77*r + 150*g + 29*b          ) >> 8;
    cb = ( -43*r - 85*g + 128*b + 32768 ) >> 8;
    cr = ( 128*r - 107*g - 21*b + 32768 ) >> 8;

    *B = (cr,cb, y);          /* pack YCbCr to B; No Compute Cycles*/
}
```

Program Loop:

```
for (...) {
    WRGET0(&A, 3);          /* Load 3 bytes (1 RGB pixels) */
    RGB2YCC(A, &B);        /* Convert 1 pixel */
    WRPUT0(B, 3);          /* Store 3 bytes (1 YCbCr pixel) */
}
```

- C-artige Schreibweise statt Verilog-artigem TIE
- Basiskonstrukte ähnlich

Laufzeit mit fusionierter Instruktion auf ISEF



A. Koch

Software	WR	ISEF (Bit-Width)	ISEF (State Reg.)	Instruction Pipeline	Cycle (K Cycles)	Acc. Factor
RGB2YCC ANSI – C Only				√	3458	1
Operator Fusion		√	√	√	219	15

Verfeinerung der ISEF-Instruktion durch SIMD



A. Koch

Color Conversion Function:

```
SE_FUNC /* Extension instruction converting pixels */
void rgb2ycc(WR A, WR *B) { /* Data Bandwidth – Move 120 bits */
    se_sint<8> r[5], g[5], b[5], y[5], cb[5], cr[5];
    int i, j;
    /* Unpack A to RGB Data, Does Not Use Any Compute Cycles */
    for (i = 0; i < 5; i++, j = i*24) { r[i] = A(j+7, j); g[i] = A(j+15, j+8); b[i] = A(j+23, j+16) }
    /* Convert 5 pixels */
    for (i = 0; i < 5; i++) {
        y[i] = ( 77*r[i] + 150*g[i] + 29*b[i] ) >> 8;
        cb[i] = (-43*r[i] - 85*g[i] + 128*b[i] + 32768) >> 8;
        cr[i] = (128*r[i] - 107*g[i] - 21*b[i] + 32768) >> 8;
    } /* pack YCbCr to B; Does Not Use Any Compute Cycles */
    *B = (cr[4],cb[4],y[4],cr[3],cb[3],y[3],cr[2],cb[2],y[2],cr[1],cb[1],y[1], cr[0],cb[0],y[0]);
}
```

Program Loop:

```
for (...) {
    WRGET0(&A, 15); /* Load 15 bytes (5 RGB pixels) */
    RGB2YCC(A, &B); /* Convert 5 pixels */
    WRPUT0(B, 15); /* Store 15 bytes (5 YCbCr pixels) */
}
```

- Rechnet auf 5 RGB Pixeln gleichzeitig

Laufzeit mit fusionierter SIMD-Instruktion auf ISEF



A. Koch

Software	WR	ISEF (Bit-Width)	ISEF (State Reg.)	Instruction Pipeline	Cycle (K Cycles)	Factor
RGB2YCC ANSI – C Only				√	3458	1
Operation Fusion		√	√	√	219	15
Vectorization	√	√	√	√	42	80

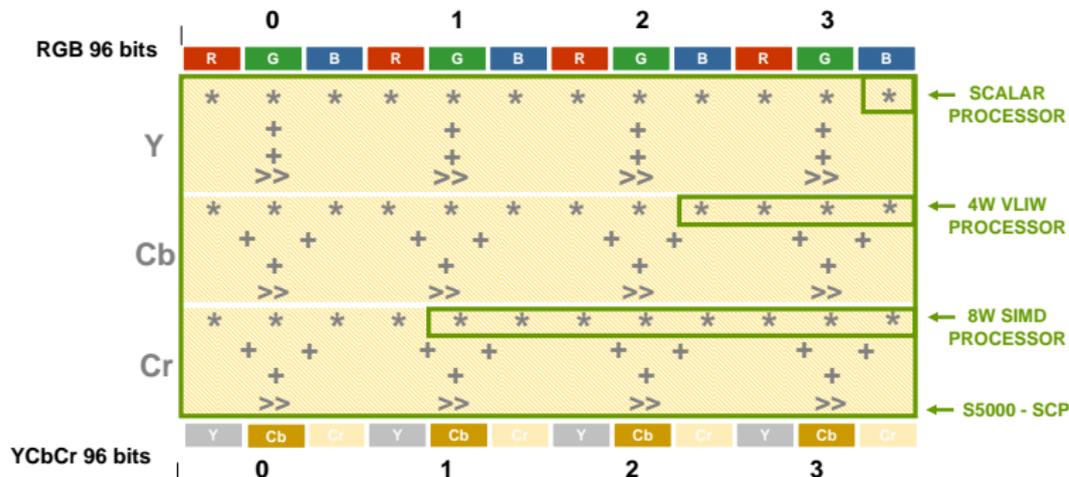
Nun 80x schneller als ursprüngliche C Version!

Grad der Parallelität bei unterschiedlichen Technologien

Annahme hier: 96b breite Datenworte



A. Koch



Nichtausgerichtete Speicherzugriffe



A. Koch

- Zugriff auf bis zu 128b breite Daten als Byte-Folgen
- Daten können **beliebig** im Speicher ausgerichtet sein
 - Unterschied zu direkten WRF Load/Store-Anweisungen
- Speicherströme (*streams*) für **reguläre** Zugriffe
 - Drei lesende, einen schreibenden
- **INIT**-Funktion programmiert je Stream
 - Startadresse
 - Richtung (aufsteigende oder absteigende Adressen)
- **GET/PUT** liest/schreibt Daten in/aus WR-Register

Beispiel: Lesen von Byte-Daten

Über Lesestrom 0



A. Koch

```
#define INCR 0
unsigned char inArray[1024];
WR X;

WRGET0INIT(INCR, inArray);    // init0 (mode, addr), init1
...
WRGET0I(&X, 6);               // load next 6 bytes into X
...
WRGET0I(&X, 9);               // load next 9 bytes into X
```

- Annahme:
`inArray[] = { 0x01, 0x02, 0x03, 0x04, 0x05, ... }`
- Nach dem erstem `WRGET0I` hat WR-Register `x` den Wert `0x060504030201`
- Nach dem zweiten `WRGET0I`:
`0x0F0E0D0C0B0A090807`

Beispiel: Schreiben von Byte-Daten

Über den einzigen Schreibstrom



A. Koch

```
#define INCR 0
unsigned char outArray[1024];
WR X;

WRPUTINIT(INCR, outArray);    // init 0
...
WRPUTI(X, 6);                 // store 6 bytes from X
...
WRPUTI(X, 9);                 // store 9 bytes from X
...
WRPUTFLUSH();                // flush0, flush1
```

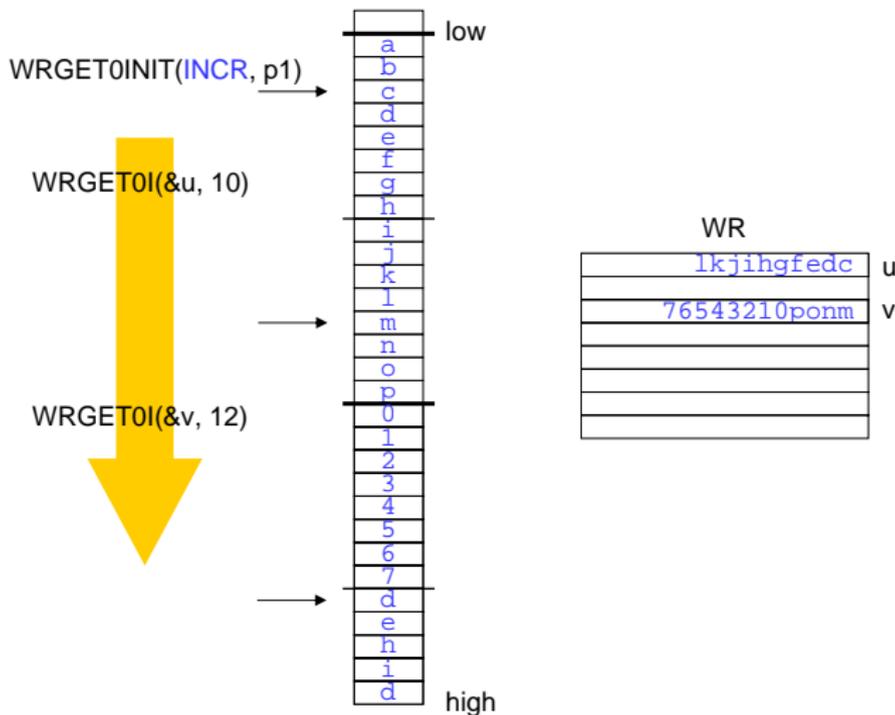
- Annahme beim ersten Aufruf: $x=0x665544332211$
- Annahme beim zweiten Aufruf $x=0xFFEEDDCCBBAA998877$
- `outArray` beginnt danach mit $0x11, 0x22, 0x33, 0x44, 0x55, 0x66, 0x77, 0x88, \dots$

Aufsteigende Adressen mit Post-Inkrement

Register wird von rechts nach links gefüllt



A. Koch



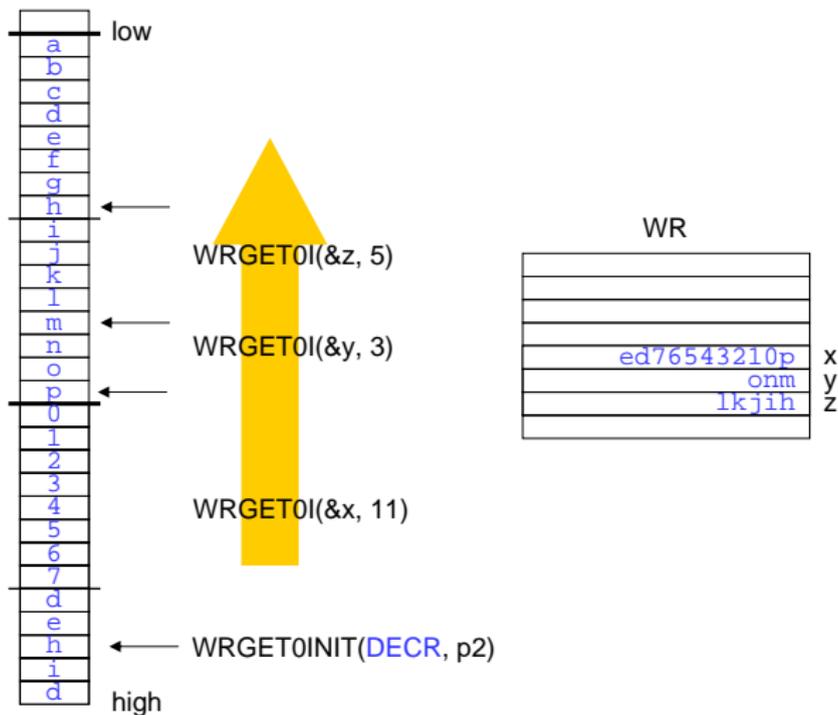
Post-Inkrement

Absteigende Adressen mit Pre-Dekrement

Register wird von links nach rechts gefüllt



A. Koch



Pre-Dekrement

Übersicht über Streaming-Befehle



A. Koch

Bank	Operation	Stream No. (GET only)	Mode
WR	GET (load)	0	I (immediate byte count and advance amount)
WRA	PUT (store)	1	X (register byte count and advance amount)
WRB		2	XX (register specifies separate byte count and advance amounts)

- Daten stehen **immer** in der Reihenfolge ihres Auftretens im Speicher im Register.
- Angaben über Länge der Leseoperation auch aus Register möglich
- Auch unterschiedliche Schrittweiten möglich
 - 4 Bytes lesen, nächste Leseadresse aber um 8 Bytes erhöhen
- Ähnliche Befehle lesen/schreiben auf **Bit-Ebene**
 - Bis zu 32b in einer Operation lesbar



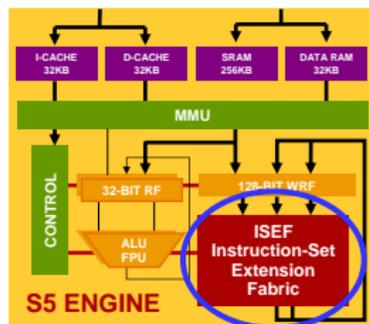
- Rekonfigurierbare Prozessoren
- Stretch S5000-Architektur
- Erstes Beispiel in Stretch-C
- Schwerpunkt: Kommunikation mit ISEF
 - Wide Registers ausgerichtet lesen/schreiben
 - Streaming von unausgerichteten Daten

Instruction-Set Extension Fabric

Kann als konfigurierbare ALU angesehen werden



A. Koch



- Maximal 48 Bytes Operanden (drei 128b WR-Register)
- Maximal 32 Bytes Ergebnis (zwei 128b WR-Register)
- Pipelined, multi-zyklen Operationen realisierbar
- S5 Engine hat **zwei** ISEF RAs
 - Teilen sich dieselben Register
 - Nur ein ISEF gleichzeitig aktiv
 - Vorteile: Mehr Platz und schnellere Rekonfiguration